

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.02.007

220 kV 变压器低压侧 10 kV 无功补偿装置电容器 绝缘故障分析

张宗喜

(国网四川省电力公司电力科学研究院, 成都 610041)

摘要: 电容器无功补偿对提高系统的电压稳定、降低输电线损及变电损耗起着重要的作用。针对某 220 kV 变电站 10 kV 系统发生的电容器外熔断器保护全部熔断及本体烧毁事故, 基于故障电容器的解剖情况, 分析了电容器绝缘损坏的主要原因以及故障进一步扩大的原因, 计算分析发现电容器不平衡保护整定值不合理性, 并通过仿真软件 PSCAD/EMTDC 复现故障过程, 验证故障结果, 最后为避免故障再次发生提出了相应的处理建议, 保证电容器的正常运行。

关键词: 无功补偿; 并联电容器; 故障分析; 双星形; PSCAD

Insulation Fault Analysis of Capacitor in 10 kV Reactive Power Compensation Device Capacitor on Low Voltage Side of 220 kV Transformer

ZHANG Zongxi

(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, China)

Abstract: Reactive power compensation of capacitor plays an important role in improving voltage stability of the system, reducing loss of transmission line and substation. In view of full fusion and body burning of external fuse protection of capacitor of 10 kV system at one for a 220 kV substation, the main reasons for the capacitor insulation damage and the further expansion of the fault are analyzed on the basis of the unplaning of the faulty capacitor. The irrationality of imbalance protection setting is found by calculation analysis, the fault process is repeated through simulation software PSCAD/EMTDC and the fault result is verified. Finally, corresponding treatment suggestions are proposed to avoid the recurrence of the fault and assure normal operation of capacitor.

Keywords: reactive power compensation; shunt capacitor; failure analysis; double star; PSCAD

0 引言

随着国民经济水平的提高, 电网容量不断增加, 更加要求电力系统的无功补偿能有效改善电网的功率因数、提高终端变电所的电压和补偿主变的无功损耗。针对我国集中补偿方式的变电站, 补偿装置包括并联电容器、同步调相机、静止无功补偿装置等^[1-6]。其中, 高压并联电容器由于其接线简单、经济、方便灵活的优点, 在无功补偿系统中得到了广泛应用, 占据着相当大的地位。其安全运行直接关乎电能质量和电力系统稳定。虽然电容器的可靠性已随着生产工艺和材料的改进有了大幅度

的提高, 但据统计资料显示, 最近几年仍不断发生严重的电容器爆炸事故, 影响了工作生产的正常运转^[7-15]。本文针对某 220 kV 变电站并联电容器装置发生爆炸、鼓肚等故障, 通过仿真软件复现分析了故障原因, 并提出相关建议防止故障的再次发生。大量资料表明, 多数情况下的故障是可以避免或者可有效防止故障进一步扩大的。

1 故障简介及设备基本情况

1.1 故障情况

2022 年 5 月 27 日, 某 220 kV 变电站 10 kV 系统发生了电容器组整组外熔断器烧毁故障, 造成 18 只

收稿日期: 2023-09-14

基金项目: 国网四川省电力公司科技项目(52199723000H)。

电容器外熔断器烧毁,另外该组电容器不平衡保护用的电流互感器也被烧毁,如图1所示;C相6、7、9与B相3、16号电容器均有不同程度鼓肚现象,13只电容器电容值不合格,一共有18只电容器在这次事故中损坏,损失严重,如图2所示。



图1 整组外熔断器与不平衡电流互感器烧毁后
Fig. 1 Entire set of external fuses and unbalanced current transformers burned



图2 部分电容器鼓肚现象
Fig. 2 Bulging phenomenon of some capacitors

1.2 设备基本情况

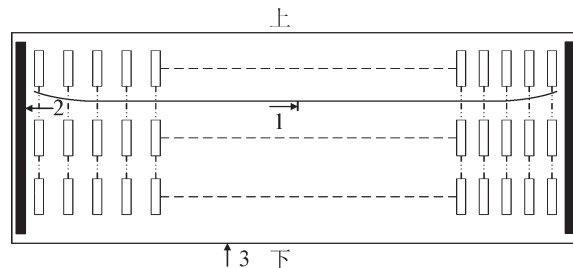
该电容器组配置的保护主要为过电流保护、不平衡保护和外熔丝保护(BRW-7/100p/80),其中过流Ⅱ段保护定值 10.5 A、0.2 s,过流Ⅲ段 3.94 A、0.5 s,变比 600/5;电容器不平衡 CT 电流保护定值为 3.09 A, 0.2 s,变比 15/5;单台并联电容器型号 BFF11/ $\sqrt{3}$ -334-1W 型;电抗器为 CKK-120/10-6 型,额定电流为 315A;不平衡电流互感器为 ZJG-10 型,变比 15/5;2001 年投运。

2 故障分析

2.1 电容器绝缘分析

熔断器烧毁、爆炸一定是过电流的结果,电容器鼓肚、爆炸一定是过电压的作用^[9]。为了深入分析 10 kV 无功补偿电容器的爆炸情况,特对两只故障电容器(一只为爆炸后的电容器,另一只为鼓肚的电容器)进行现场解剖。电容器内部的基本结构如图3所示,其中最外面为外壳,内部串联3段,由

隔层绝缘隔开,每段并联17个单电容元件,若干个电容元件串并联连接组成电容器的心子。



1—单个电容元件; 2—隔层绝缘; 3—电容器箱壳。

图3 并联电容器结构图
Fig. 3 Structure diagram of shunt capacitor

其中发生爆炸的电容器运行在母线侧(高电位端),解剖发现每串中都有一个心子发生贯穿性放电。元件绝缘有多处击穿孔及对应的击穿痕迹。连接片大部分烧熔,有心子发生贯穿性放电,但两极间未发生贯穿性放电。侧面小圆弧处,有心子对外壳由里向外、尚未贯穿的放电点,放电点处绝缘纸烧穿的直径约 4 mm。对部分心子的绝缘纸进行检查,发现部分绝缘纸已变黄,变脆。从解剖的情况可以看出,电容器心子的绝缘老化严重,击穿部位大多集中在电容器心子的侧面小圆弧处,在远离击穿点的部位取出的电容器纸已发黄、发脆。

2.2 故障发展过程

从故障现场、故障录波数据及电容器解剖情况来看,故障过程大致为:电容器在运行过程中,由于受开关合闸冲击的影响,某相电容器率先出现内部元件故障,内熔丝熔断,熔断过程中出现燃弧使得电压波动加剧,不平衡保护未可靠动作导致故障进一步发展,电容器心子对外壳贯穿性击穿,造成电容器故障相接地故障。故障相接地后,非故障相电压上升至 $\sqrt{3}$ 倍,部分电容器因过电压发生爆炸、鼓肚等故障;同时非故障相电容器内部元件在过电压的累积作用下出现贯穿性击穿并对外壳放电击穿最后形成两相短路故障,短路电流高达几千安,但持续时间只有十几毫秒,过流保护由于时限不足未可靠动作,造成外熔断器雪崩式烧毁。

2.3 内部元件故障原因

诱因是由于电容器投切对内部元件产生了冲击,导致三相电压出现波动;其次通过电容器解剖后发现,其内部心子已绝缘老化,部分绝缘纸已发黄、变脆,加速绝缘老化的原因可能是电容器生产过程中由于真空浸渍不彻底或绝缘纸材质不可靠等原因,严重影响电容器内部绝缘,在长时间的运行下,由于过电压的累积作用使得内部元件发生了

击穿。另外此电容器属于膜纸复合的老式结构,内熔丝放置在元件端部且相互之间的隔离不好,内熔丝因元件故障动作时,可能引起周围的内熔丝误动作,导致电容器内部出现较高的过电压,造成相邻元件出现击穿且发展很快。同时,膜纸复合电容器的耐爆性能较差(通常不能超过 10 kJ),如果不平衡保护不能及时将故障电容器切除,将会导致电容器外壳鼓肚、破裂甚至爆炸的恶性故障。外熔断器也会因此熔断甚至炸飞。

2.4 不平衡保护未动作原因

该型号电容器采用内熔丝保护和双星形不平衡电流保护,每相 1 串 6 并,内部单元元件连接方式为 17 并 3 串。在内熔丝保护下,当极间出现单元元件受损,内熔丝熔断将损坏元件隔离,电容器的电容量出现变化将减小,在电容量变化引起的不平衡电流达到保护整定值时,位于中性线电流互感器二次侧的电流继电器就会动作跳开开关,电容器组退出运行,防止故障进一步发展^[16-18];现场核实后证实双星形不平衡电流保护没有动作,并且 CT 在故障中烧毁。该故障电容器不平衡保护的定值为 3.09 A、0.2 s。根据 DL/T 1415—2015《高压并联电容器装置保护导则》中双星形不平衡电流保护计算公式可算得对应得同一串段中最大切除元件数为 $k=11$,此时完好元件过电压倍数 $K_c=1.8$,而按照 GB 50227 并联电容器装置设计规范及 DL/T 584 继电保护装置运行整定规程要求^[19-25],在 1.3 倍的过电压下,电容器只能运行 1 min,所以该保护整定值并不合理。

按照电容器内部单元元件过电压不超过 1.3 倍分析计算,计算结果为

$$k = \frac{3MNmn(K_c - 1)}{K_c(3MNn - 3MN + 6N - 5)} = 5.73 \approx 6$$

即电容器内部单独串段允许故障的单元元件为 6 只。此时对应的不平衡 CT 一次侧电流的计算结果为

$$I_0 = \frac{1.5K'}{3N(Mmn - MnK' + MK' - 2K') + 5K'} I_N = 4.08 \text{ A}$$

即流过不平衡 CT 的电流为 4.08 A,不平衡 CT 的变比为 15/5,对应的不平衡 CT 的二次电流为 1.36 A,考虑到保护灵敏度,该电容器保护整定值小于 2 A^[15-16]。式中: m 为单只电容器内部串联段内并联元件数, $m=17$; n 为单只电容器内部串联段数, $n=3$; I_N 为电容器额定电流, $I_N=315 \text{ A}$; N 为每相的串联段数, $N=1$; M 为每相单串段内的并联电容器数, $M=6$; K_c 为电容器内部单元元件允许的过电压倍数, $K_c=1.3$; k 为保护整定时允许切除的内部元件

数; K' 取 k 的整数, I_0 为不平衡电流。

另外该组故障电容器的外部装设了外熔断器,主要是作为短路保护,为了克服内熔丝的保护死区,即:电容器内部引线之间短路和电容器套管闪络击穿,以及作为电容器内部元件串段发生击穿短路(内熔丝保护失效)的后备保护。结合故障录波图分析,在整个故障过程中, A 相出现了短路接地故障,正是外熔断器的正确动作,防止了电容器在瞬时注入的能量下没有发生箱壳炸裂,甚至起火。

3 仿真分析

结合上述故障过程分析,利用电磁暂态 PSCAD/EMTDC 软件对该故障进行复现分析,为便于对故障过程进行复现,用理想电源、串联电抗器、电容器及开关进行故障模拟,分析模型如图 4 所示。

其中相电压为 6.351 kV,根据单相电容器 6 并 1 串,计算得出单相回路的容抗 $X_c=20 \Omega$ 。因串联电抗器为 6%,得到单相回路感抗 $X_L=1.2 \Omega$,对应的电感值为 0.003 8 H,各电容取铭牌值,将本次故障分为如下几个阶段:1)假设右侧星形连接支路 A 相首先出现内部故障,导致内熔丝熔断,燃弧过程中使得电压波动,导致 B、C 相电容器陆续出现内部熔丝故障,其中 A 相电容器对壳击穿,在本阶段末尾出现接地故障,使得 B、C 相电压的畸变加剧;2)A 相出现接地故障导致 A 相外熔断器熔断,此间 B、C 相过电压变为原来的 $\sqrt{3}$ 倍,该过程持续到右侧 A 相外熔断器熔断为止;3)在右侧全部电容器组被外熔丝熔断隔离后,左侧电容器组故障继续发展,电容器内熔丝不断熔断,导致电流急剧波动,直到本阶段的最后一刻, A、B 相出现相间短路,外熔丝因过流全部动作熔断,隔离整组电容器,电压恢复正常。

经过对故障过程的仿真分析,仿真的结果基本和故障过程相吻合,仿真波形与故障录波相吻合,同时也验证了上述对故障原因的分析。

另外在外熔断器未熔断时,双星形连接点的电压由 0 突变为 A 相电压,在此暂态过程中将有高频涌放电流流过不平衡 CT,由于外熔断器的阻值很低,不能起到限制高频涌放电流幅值的作用,造成不平衡 CT 及一次侧低压避雷器烧毁。仿真分析结果如下:由仿真结果可知,在 A 相出现短路故障时,流过不平衡 CT 的涌放电流峰值约为 3.535 kA,远大于该电流互感器的额定短时热电流 1.125 kA 和额定动稳定电流 2.25 kA,这也是造成不平衡 CT 烧毁的主要原因。

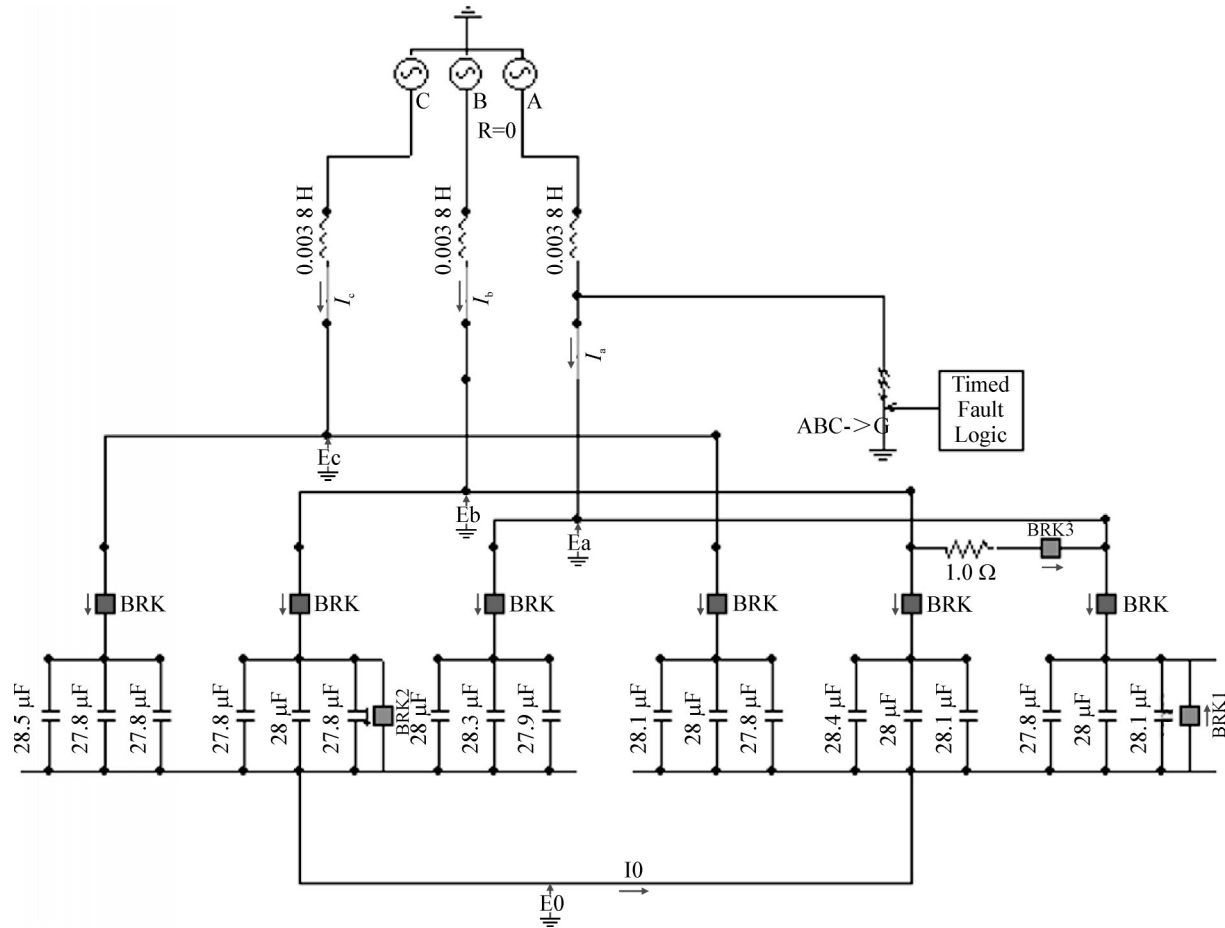


图4 仿真分析模型图
Fig. 4 Simulation analysis model diagram

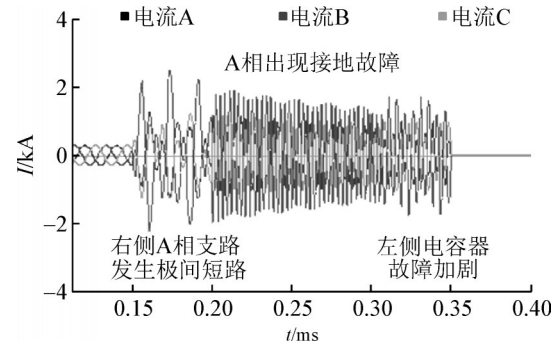


图5 仿真分析的电流波形
Fig. 5 Current waveform of simulation analysis

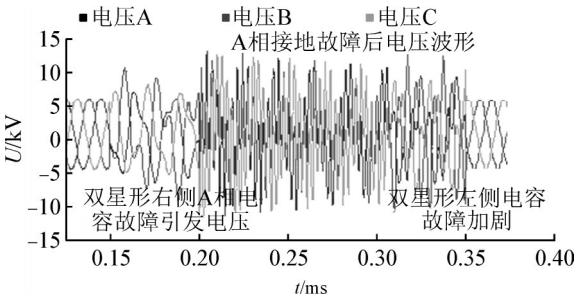


图6 仿真分析的电压波形
Fig. 6 Voltage waveform of the simulation analysis

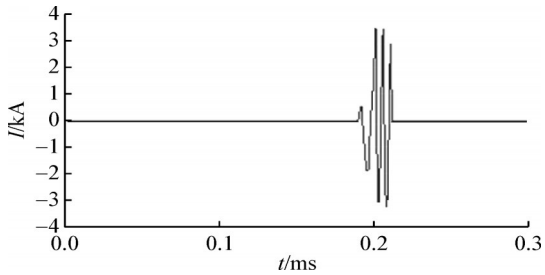


图7 短路瞬间流过不平衡CT的故障电流
Fig. 7 Fault current flowing through the unbalanced CT at instant of short circuit

4 结语

电容器的绝缘状态与变电站无功补偿部分的工作可靠性密切相关,需要根据现场运行条件及相应标准,合理设计绝缘的工作场强,保障电容器的稳定运行。同时电容器不平衡电流保护也是电容器正常工作的关键部分,正确整定中性点不平衡电流动作值,能有效地防止故障的发生,保障无功补偿装置安全运行。

1)不平衡保护设置不合理,针对本次电容器故障,根据 GB 50227—2008《并联电容器装置设计规

范》要求,不平衡保护作为单台电容器内部故障时的保护时,应按单台电容器内部元件允许的最大过压允许值进行保护整定。建议不平衡 CT 保护定整定值在避开合闸涌流影响避免误动的情况下,结合厂家建议适当提高保护的灵敏度;

2)电容器组在故障条件下出现了严重过电压,同时该组电容器组运行时间较长,其内部绝缘出现薄弱点,绝缘老化严重,在过电压的作用下造成故障的进一步发展;

3)故障产生的放电电流过大导致不平衡 CT 损坏,在选择不平衡保护用 CT 时,应选用加强绝缘型,或在满足保护灵敏度的前提下提高变比,以耐受故障状态时的涌放电流的冲击;

4)增设并联电容器在线监测与故障预警装置。为解决传统检测方法费时费力的缺点,应适当增设在线监测装置并设置故障预警阈值。在线监测主要针对渐变状态量与突变状态量两种,其中渐变主要是局部放电、介损等一系列随电容器内部缺陷累积而变化的状态量;突变量监测主要是监测过电压(电流)、不平衡电压(电流)及电容量,这些状态量可瞬时表征电容器内部故障变化,由于状态量瞬时变化,需设置故障预警阈值,一般按照电容器运行电压达到 1.1 倍额定电压时发出预警,提醒运维检修人员尽快排除故障,防止电容器非计划停运;另外对于运行时间较长的老结构电容器应及时关注其工作状态,确保不能带病运行,必要时进行更换。

参考文献

- [1] 张智光,倪秋龙,廖培,等. 计及新能源消纳的地区电网无功电压优化控制策略[J]. 浙江电力, 2023, 42(1): 46-53.
ZHANG Zhiguang, NI Qiulong, LIAO Pei, et al. An optimal reactive voltage control strategy for regional power grids considering new energy consumption[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(1): 46-53.
- [2] 赵清松,王世成,张冠峰,等. 大型光伏电站并网系统的无功优化配置方案分析[J]. 东北电力技术, 2021, 42(10): 5-10.
ZHAO Qingsong, WANG Shicheng, ZHANG Guanfeng, et al. Analysis of reactive power optimal allocation for grid connected system in large scale photovoltaic power station[J]. Northeast Electric Power Technology, 2021, 42(10): 5-10.
- [3] 李文竹,寇汉鹏. 考虑暂态过电压抑制的新能源送出型电网无功优化方法[J]. 电瓷避雷器, 2023(6): 117-125.
LI Wenzhu, KOU Hanpeng. Reactive power optimization method of new energy outgoing grid considering transient overvoltage suppression[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(6): 117-125.
- [4] 乔春雨,易建波,谷宇杰,等. 基于虚拟同步机技术的光储协控无功优化策略[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(6): 129-136.
QIAO Chunyu, YI Jianbo, GU Yujie, et al. Reactive Power optimization strategy of photovoltaic and energy storage Co-control based on virtual synchronous generator[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(6): 129-136.
- [5] 张晓英,侯秉臣,王琨,等. 基于改进天牛须算法的含固态变压器的配电网无功优化[J]. 高压电器, 2022, 58(11): 221-229.
ZHANG Xiaoying, HOU Bingchen, WANG Kun, et al. Reactive power optimization of distribution network with solid state transformer based on improved beetle antennae search algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(11): 221-229.
- [6] 秦帅,邹晴,李超然,等. 基于深度学习和智能在线场景匹配的配电网源网荷储无功协调优化策略[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(5): 25-35.
QIN Shuai, ZOU Qing, LI Chaoran, et al. Strategy on reactive power coordination optimization in distribution network source-network-load-storage system based on deep learning and intelligence online scene matching[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(5): 25-35.
- [7] 孔非凡. 一起变压器直流电阻不平衡故障的深入分析[J]. 变压器, 2022, 59(12): 65-68.
KONG Feifan. In-depth analysis of transformer DC resistance unbalance fault[J]. Transformer, 2022, 59(12): 65-68.
- [8] 黄斌,李昊,徐姗姗,等. 一起 35 kV 并联电容器组爆炸原因分析及防范措施[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(1): 23-27.
HUANG Bin, LI Hao, XU Shanshan, et al. Reason analysis and precautionary measures for a 35 kV shunt capacitor bank explosion[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(1): 23-27.
- [9] 李佳琪,咸日常,张宁,等. 一起电流互感器绝缘故障引发停电事故的分析与处理[J]. 变压器, 2022, 9(2): 51-55.
LI Jiaqi, XIAN Richang, ZHANG Ning, et al. Analysis and treatment of a power failure caused by insulation fault of current transformer[J]. Transformer, 2022, 59(2): 51-55.
- [10] 刘冰,郝力强. 一起并联电容器的故障分析及应对措施[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35(5): 81-85.
LIU Bing, HAO Liqiang. Analysis and reply measure for a shunt capacitor bank fault[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(5): 81-85.
- [11] 陈涛,李必伟,韩源,等. 考虑零序不平衡电流的小电流接地系统故障选线研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(4): 124-

130.
CHEN Tao, LI Biwei, HAN Yuan et al. Fault line selection of low-current grounding system considering zero-sequence unbalanced current[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2022 (4): 124-130.
- [12] 高压并联电容器装置保护导则: DL/T 1415—2015 [S]. 2015.
Guide for the protection of high voltage shunt capacitor installations: DL/T 1415—2015 [S]. 2015.
- [13] 并联电容器装置设计规范: GB 50227—2008 [S]. 2008.
Code for design of installation of shunt capacitors: GB 50227—2008 [S]. 2008.
- [14] 3 kV~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程: DL/T 584—2007 [S]. 2007.
Setting guide for 3 kV~110 kV power system protection equipment: DL/T 584—2007 [S]. 2007.
- [15] 徐岸非, 黄晴宇, 沈磊, 等. 局部电网三相不平衡畸变电流补偿方法[J]. *电网与清洁能源*, 2022, 38(10): 17-27.
XU Anfei, HUANG Qingyu, SHEN Lei, et al. A three-phase unbalanced distortion current compensation method for local power grids[J]. *Power System and Clean Energy*, 2022, 38(10): 17-27.
- [16] 王昊晴, 刘宁, 李向阳, 等. 基于熔断器的组合式直流开断技术研究及验证[J]. *高压电器*, 2023, 59(10): 38-45.
WANG Haoqing, LIU Ning, LI Xiangyang, et al. Research and verification of combined DC breaking technology based on fuse[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(10): 38-45.
- [17] 王飞鸣, 李冰, 伊文龙, 等. 12 kV 跌落式熔断器运行特性及试验研究[J]. *东北电力技术*, 2021, 42(8): 12-15.
WANG Feiming, LI Bing, YIN Wenlong, et al. Characteristics and test research of 12 kV drop-out fuse operation[J]. *Northeast Electric Power Technology*, 2021, 42(8): 12-15.
- [18] 李江, 费亚琴, 郭强, 等. 负荷开关—熔断器组合电器转移电流开断试验回路浅析[J]. *高压电器*, 2023, 59(7): 207-212.
LI Jiang, FEI Yaqin, GUO Qiang, et al. Analysis of test circuit for transfer current breaking tests of switch-fuse combination[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(7): 207-212.
- [19] 刘家宁, 叶鹏, 叶臻, 等. 基于对抗生成网络的三相不平衡对低压台区线损影响量化分析[J]. *东北电力技术*, 2021, 42(10): 26-30.
LIU Jianing, YE Peng, YE Zhen, et al. Quantitative analysis of three-phase unbalanced to influence of line loss in low voltage station area based on confrontation generation network[J]. *Northeast Electric Power Technology*, 2021, 42(10): 26-30.
- [20] 郭陆, 张广东, 刘康, 等. 750 kV 变压器电压不平衡两相补偿快速计算方法[J]. *高压电器*, 2023, 59(1): 102-108.
GUO Lu, ZHANG Guangdong, LIU Kang, et al. Fast calculation method of two-phase compensation for voltage unbalance of 750 kV transformer[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(1): 102-108.
- [21] 张军阳, 赵二冬, 张德惠. 并联无功补偿电容器组熔断器群爆现象分析和对策研究[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2008, 29(6): 49-53.
ZHANG Junyang, ZHAO Erdong, ZHANG Dehui. Analysis and solution of fuse multi-explosion failures of reactive compensation shunt capacitor bank[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2008, 29(6): 49-53.
- [22] 倪学锋, 刘瑞云, 林浩, 等. 关于无熔丝电容器和内熔丝电容器优劣的一点看法[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2012, 33(5): 28-32.
NI Xuefeng, LIU Ruiyun, LIN Hao, et al. Opinion about merits and demerits of internally fused capacitor and fuseless capacitor[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2012, 33(5): 28-32.
- [23] 盛国钊, 倪学锋, 严飞. 单台电容器内部故障保护的合理选择[J]. *电力设备*, 2008, 9(11): 61-63.
SHENG Guozhao, NI Xuefeng, YAN Fei. Reasonable selection of internal fault protection for single capacitor[J]. *Electrical Equipment*, 2008, 9(11): 61-63.
- [24] 靳建峰, 沈黎明, 翁利民, 等. 集中补偿并联电容器组熔断器“群爆”的解决方法[J]. *电力自动化设备*, 2003, 23(6): 74-76.
JIN Jianfeng, SHEN Liming, WENG Limin, et al. Solution for colony fusing failure of centralized-compensate shunt-capacitors fuses[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2003, 23(6): 74-76.
- [25] 彭晶, 邓云坤, 王科, 等. 真空断路器预击穿特性对选相关合电容器组抑制涌流的影响[J]. *电器与能效管理技术*, 2022(1): 7-13.
PENG Jing, DENG Yunkun, WANG Ke, et al. Effect of vacuum circuit breakers prestrike characteristics on inrush current suppression of controlled switching capacitor banks[J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2022(1): 7-13.

作者简介:

张宗喜(1984—), 男, 正高级工程师, 主要从事线圈类设备技术管理工作。